

특집 : 3D 프린팅 전자소자 패키징

## 3차원 인쇄기술을 이용한 전자소자 연구 동향

박예솔<sup>1</sup> · 이주용<sup>1,2</sup> · 강승균<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 재료공학부

<sup>2</sup>서울대학교 신소재공동연구소

### 3D Printed Electronics Research Trend

Yea-Seol Park<sup>1</sup>, Ju-Yong Lee<sup>1,2</sup>, and Seung-Kyun Kang<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

<sup>2</sup>Research Institute of Advanced Materials, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

(Received May 27, 2021; Corrected June 3, 2021; Accepted June 7, 2021)

**초 록:** 3차원 인쇄 기술은 제품의 설계를 3차원으로 하여 조립없이 제품의 생산까지의 시간을 획기적으로 줄이고 복잡한 구조도 구현할 수 있어 미래의 기술로 각광받고 있다. 본 논문은 3차원 인쇄기술을 이용한 전자소자에 대한 최근 연구동향을 알아보면서 구성품, 전원공급장치와 회로에서의 연결과 3차원 인쇄기술 PCB의 응용한 연구논문들을 소개하고 있다. 3차원 인쇄기술로 제작한 전자소자는 윈스톱으로 전자소자, 솔더링(soldering), 스택킹(stackings), 회로의 봉지막(encapsulation)까지 제작함으로써 생산설비의 단순화와 전자기기를 개인 맞춤형을 할 수 있는 가능성을 보여주었다.

**Abstract:** 3D printing, which designs product in three dimensions, draws attention as a technology that will lead the future for it dramatically shortens time for production without assembly, no matter how complex the structure is. The paper studies the latest researches of 3D-printed electronics and introduces papers studied electronics components, power supply, circuit interconnection and 3D-printed PCBs' applications. 3D-printed electronics showed possibility to simplify facilities and personalize electric devices by providing one-stop printing process of electronic components, soldering, stacking, and even encapsulation.

**Keywords:** 3D printing, 3D-printed electronics, 3D-printed PCB, Additive Manufacturing

## 1. 서 론

오늘날 3차원 인쇄 기술(적층 제조)은 4차 산업혁명과 함께 제조 공법의 혁신을 가져올 것으로 전망한다.<sup>1)</sup> 3차원 인쇄 기술은 아이디어 구상에서 제품의 생산까지의 과정이 단축되고 이론적으로만 존재했던 최적의 구조를 까다로운 조립없이 한번에 생산을 가능하게 한다.<sup>2)</sup> 또한 서로 다른 소재를 적용하여 제작하는 일도 용이하다.<sup>3,4)</sup> 3차원 인쇄 기술을 이용하여 전자소자를 인쇄하는 것은 미래 소자기술에서 요구되는 다양한 구조와 표면에 유연하게 결합이 가능한 기술이다.<sup>4,9)</sup> 표면에 복잡하고 고유한 구조를 갖는 장기에 대해서도 개인 맞춤형으로 생산이 가능하고 인체의 복잡한 형상에 적용하여 밀착되는 등<sup>5,6)</sup> 장점을 가지면서도 제조과정이 단순화되어<sup>7)</sup> 설계에서 제

조까지 윈스톱으로 짧은 시간에 간단하게 전자기기를 제작할 수 있다. 대량생산된 기성품이라고 생각되었던 전자소자 자체도 다품종 맞춤형으로 가능하게 한 것이 3차원 인쇄 기술이다.<sup>8,9)</sup>

1986년 Charles Hull이 3차원 인쇄 기술(SLA: Stereolithography Apparatus)을 최초로 특허 출원한 이후<sup>10)</sup> 미국 텍사스 주립대학교 엘파소 캠퍼스(University of Texas at El Paso) Keck Center에서는 2000년대 후반에 광경화성 수지에 UV를 주사하여 굳혀서 몰드를 만들고, 전도성 재료를 직접 주사하는 기술을 결합하여 3차원 전자회로(3D Electronics) 기술을 개발하였다.<sup>4)</sup> 이후 전기적 성질을 띠는 기능성 소재로 전자소자를 3차원 인쇄하는 시도로 2009년 하버드대학교(Harvard University) 제니퍼 루이스(Jennifer Lewis)팀에서 3차원 인쇄된 전극이 최초 보고되

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: kskg7227@snu.ac.kr

© 2021, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

었다.<sup>11)</sup> 이후에도 3차원 인쇄 기술을 기반으로 더 작은 크기와 더 정교한 구조를 만드는 게 가능해지면서 전자적 기능이 부여되고 마이크로 시스템에 적용될 전자소자들이 보고되고 있다.<sup>12-14)</sup>

본 리뷰논문에서는 3차원 인쇄 기술로 제작한 전자소자의 연구동향을 살펴보면서 수동 전자소자부터 능동 전자소자까지 제작한 대표적인 연구에서 3차원 인쇄 기술에 사용된 소재와 구조, 전자소자의 성능에 대하여 알아보았다. 나아가 3차원 인쇄기술로 에너지 전자소자를 제작하고, 3차원 인쇄 센서로 응용한 연구를 소개하였다. 마지막으로 회로를 연결할 수 있는 전극과 독립적 동작이 가능한 소자와 장치까지 확장하는 연구를 소개하였다. 3차원인쇄하는 기술이 전자소자로 회로의 구성요소를 인쇄하는 데 시작하여 인터커넥션(interconnection), 스택킹(stackings), 인캡슐레이션(encapsulation)까지 원스톱 패키징(one-stop packaging)으로 확장이 가능함을 보여주고자 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 3차원 인쇄기술을 이용한 수동 전자소자

전자 회로를 구성하는 소자 중 전기적 에너지를 소모, 저장 혹은 전달 할 뿐 다른 역할을 하지 않는 소자를 수동 전자소자라고 하며, 저항, 캐패시터, 인덕터 등이 있다. 전도성 잉크를 바탕으로 원하는 만큼의 성능을 가진 수동 전자소자를 설계하여 인쇄하는 것이 가능하며, 다양한 소재와 구조를 디자인하여 제작하려는 연구들이 수행 중이다.<sup>12,15,16)</sup> 전자기기의 크기는 수동전자소자의 크기로 결정되는 경향이 있는데, 구조와 크기 공정의 자율화로 인하여 수동전자소자의 소형화가 가능하다면 전자기기의 소형화도 가능해지므로 큰 장점이다. 두번째로 3차원 인쇄 전자소자는 기존의 솔더링(soldering)을 하지

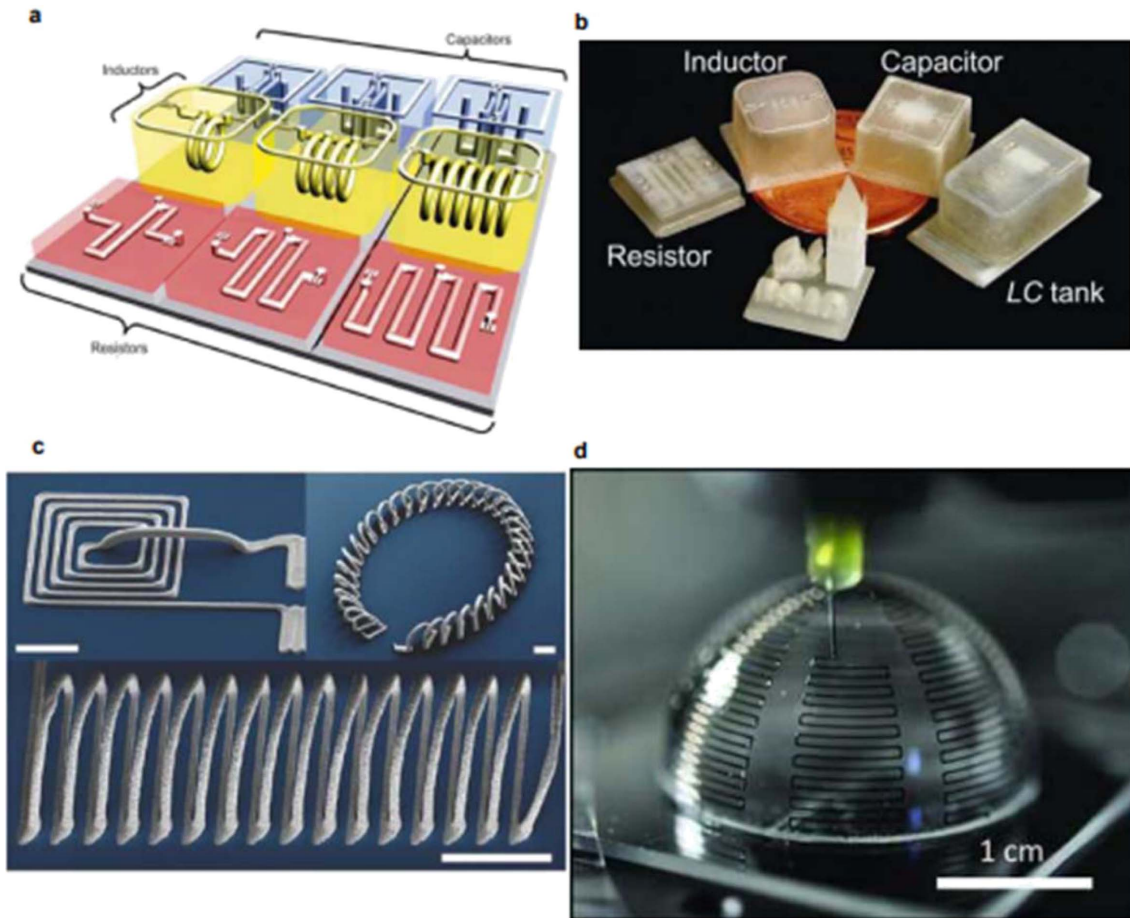
않아도 되는 장점이 있다. 오늘날 사용되는 표면실장 수동 부품은 PCB (Printed Circuit Board) 표면에 직접 고정하는데 연결지점에서 납땜(솔더링)을 수행할 때 신뢰성이 감소한다. 3차원 인쇄기술로 제조된 수동 전자소자는 솔더 조인트(solder joint)가 필요하지 않기 때문에 회로 크기를 줄이고, 전체 회로의 신뢰성을 높일 수 있기 때문에 유리하다.<sup>15)</sup>

Fig. 1(a)는 수동형 전자소자의 대표적인 예시인 캐패시터(capacitor), 인덕터(inductor), 저항의 몰딩구조를 보여주고 있다.<sup>12)</sup> ProJet HD 3000 프린터를 이용하여 FDM (Fused Deposition Modeling, 용융적층모델링)방식의 30  $\mu\text{m}$  해상도로 몰딩(molding)구조는 VisiJet EX200(폴리머), 희생층은 VisiJet S100(왁스)를 인쇄하고, 희생층(왁스)을 제거하여 필요한 소자의 형태를 확보한 구조가 완성되었다.<sup>12)</sup> Fig. 1(b)는 Fig. 2(a)의 VisiJet EX200(폴리머)의 몰딩구조의 빈 공간에 은 현탁액(silver suspension, Pelco 16040-30)을 주입하고 경화 과정을 거친 전자소자들의 시각적 이미지이다(미국 1센트와 크기 비교).<sup>12)</sup> 전기 전도도의 경우 평균  $\sigma$ 는  $2.8 \times 10^5 \text{ S/m}$  으로 이론적인 은(Ag) 페이스트 값의 약 10.5%이다.<sup>12)</sup> 이 차이는 은 페이스트(paste)의 경화 과정에서 채널 내부의 은 입자 간 공극을 원인으로 해석하였다. 이러한 방식 기반으로 우유 팩 뚜껑에 통합된 무선 유도 센서인 “스마트 캡”을 만드는 응용성을 검증하였다.<sup>12)</sup> 인덕터-캐패시터 공진 회로는 온도에 따른 액체의 유전 상수 변화를 감지하는데, 공진주파수가 변하는 것을 실시간 무선으로 감지하였다.<sup>12)</sup> 실내 온도 환경에서 36 시간 동안 보관된 우유 팩에서 4.3% 주파수 이동이 나타남을 보여주었다.<sup>12)</sup>

Fig. 1(c)는 은-나노 입자 잉크를 3차원 인쇄하여 4회전 평면 코일, 33회전 도넛형의 코일, 16회전 원통 코일을 제조하였다.<sup>16)</sup> 3차원 인쇄에 쓰인 은 나노 입자 잉크는 금속 나노 입자가 일반적으로 표면 캡핑제의 존재 하에 금

**Table 1.** Advantages and disadvantages of 3D printed electronic devices

	Advantages	Disadvantages
Materials	- Various materials (polymer, metal nanoparticle, semiconducting crystals) possible for device fabrication	- Rheology optimization needed for printing - Difficult to print semi-conductive materials in nano-scale
Process	- Convenience in modifying designs (Retouch is possible right before printing) - Easy to fabricate electronics with minimalized size compare to conventional fabrication - No needs to photomask or mold	- Align issues within print head while printing with multi-materials - Low reproducibility - Possibility in production of byproduct - Printing feature size needs to be improved
Printed object	- Provides conformal contact of printed objects with complex surface - Enhancement of performance from 3D logic circuit	- Post-treatment needed in order to smooth surface - High cost for maintenance of printer and materials
Economics	- Reduction of price from shorten steps in fabrication (assembly, etc.) - Low cost for installing in manufacture facility (single printer can print various parts and final products needed)	- Inefficient for massive production compare to conventional process
Reliability	- No need to solder (Lowering residual stress in interfaces which occurred in conventional process)	- Durability issues by additive manufacturing - Heterogeneity in functional inks



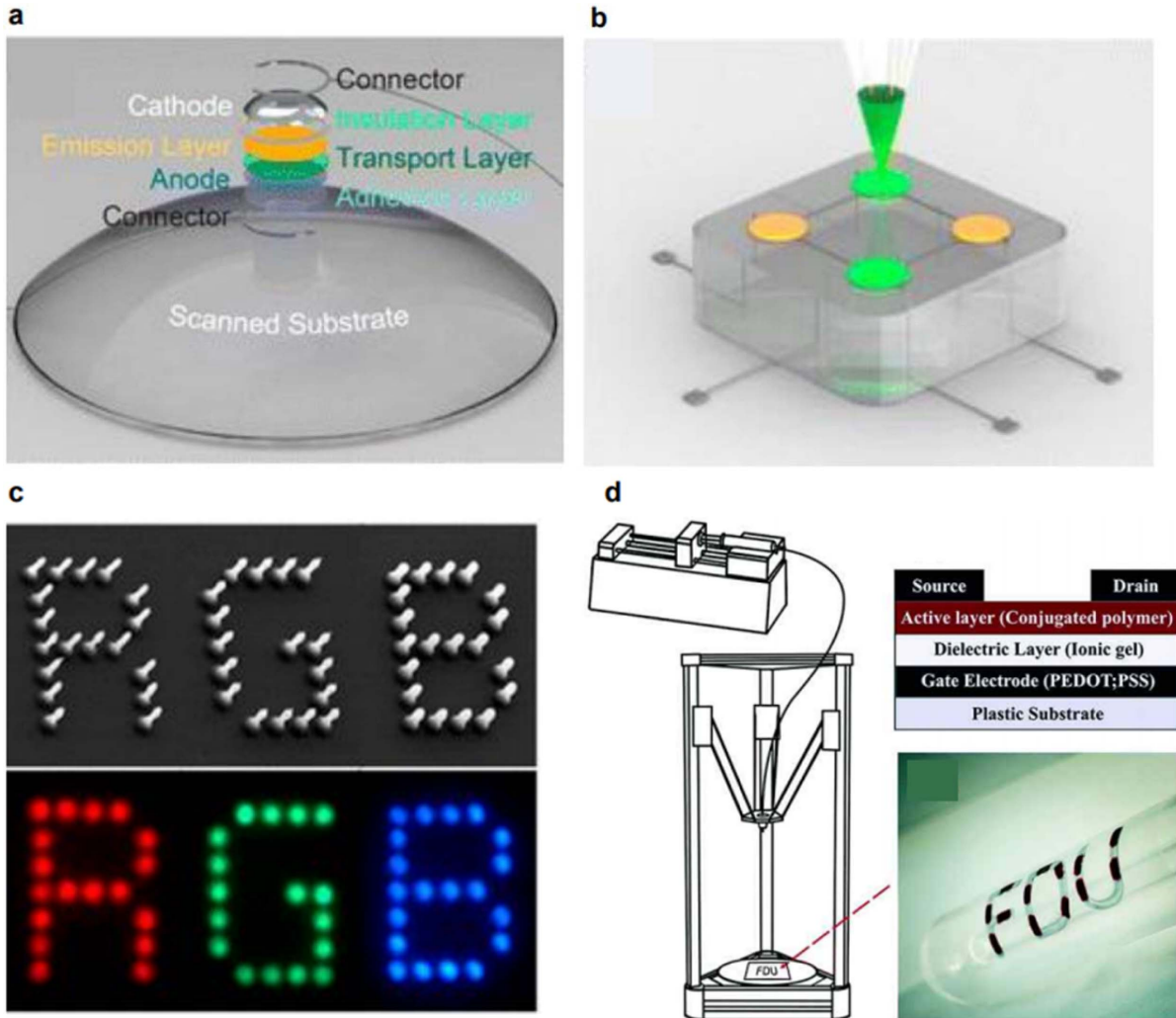
**Fig. 1.** 3D printed passive electronic components. **a)** 3D microelectronics components: capacitors, inductors, resistors. Adapted with permission from Ref. 12 © 2015, Springer Nature. **b)** 3D printed electronics passive components Adapted with permission from Ref. 12 © 2015, Springer Nature. **c)** 3D printed inductors. Adapted with permission from Ref. 16 © 2017, John Wiley and Sons. **d)** 3D printing process of small antenna. Adapted with permission from Ref. 17 © 2011, John Wiley and Sons.

속 전구체의 환원에 의해 용액에서 합성이 된다는 사실에 착안하여, 단단계 접근법으로 전구체로 질산은, 캡핑제로 PAA (polyacrylic acid), 환원제로 Diethanolamine을 포함하는 수성시스템을 사용하여 고농도로 은 나노 입자를 제조, 가열한 다음 에탄올을 첨가하여 신속한 입자 응집을 유도하였다.<sup>16)</sup> 70 wt% 이상의 고형물 부하를 얻기 위해 원심분리하고 습윤제로 ethylene glycol을 넣어 잉크가 막히지 않고 공기중에서 패턴을 출력할 수 있게 하였다.<sup>16)</sup> 이러한 은 나노 입자 잉크로 3차원 인쇄된 코일들은 최대 품질 계수 Q가 40을 초과하여 시판되는 코일의 Q값과 동등한 수준임을 보여주었다.<sup>16)</sup> 장치의 재현성과 기계적 견고성을 확인하기 위하여 20개의 동일한 원형 코일을 인쇄하였다.<sup>16)</sup> 전체 수율은 75%이며 15개의 코일은  $6.93 \pm 0.164$  nH의 인덕턴스 값을 나타내어 5 GHz에서 7 nH의 목표 인덕턴스와 일치한다.<sup>16)</sup> 나머지 5개의 코일은 유효 턴 수를 감소시키는 단락 기능을 가지고 있어서 인덕턴스 값이(>10%)이 목표 값보다 낮았다.<sup>16)</sup> 기계적 견고성 측정을 위하여 20개의 코일에 진동 테스트(12시간 동안 3000 rpm)를 수행한 다음 재 측정하였는데

오차는 0.5% 미만으로 측정되었다.<sup>16)</sup> Fig. 2(d)는 반구형 유리 기판의 볼록하고 오목한 표면에 작은 전기안테나를 3차원 인쇄하는 과정이다.<sup>17)</sup> 최적화된 설계를 3차원 인쇄하여 성능 이론적 한계에 접근하였으며 작동주파수와 크기를 지정할 수 있었다. 전도성이 있는 등각(conformal) 출력은 착용형 장치, 체내삽입형 센서로 응용 가능성을 보여주었다.<sup>11)</sup> 기능성잉크와 3D프린터만 있으면 3차원 공간에서 구조를 수정하여 기능적 다양성을 확장할 수 있는 잠재력과 함께 RF 수동 장치를 만드는 새로운 접근 방식을 제공하였다. 수동전자소자의 3차원 인쇄 방식은 그 외에도 탄소나노튜브와 폴리머 복합재를 이용하여 저항을 출력하는 등<sup>18)</sup>의 모습을 보이고 있다. 3D프린터 잉크의 전기적 성질과 제조의 연구가 계속된다면 3D프린터와 기능성 소재로 잉크를 만들어 부품에 대한 재고관리 없이 필요한 성능의 기판의 구성이 가능해질 것이다.

## 2.2. 3차원 인쇄기술을 이용한 능동 전자소자

능동 전자소자는 전자회로를 구성하는 소자 중에 입



**Fig. 2.** 3D printed active electronic components. **a)** 3D printed QD-LED on a curvilinear substrate. Adapted with permission from Ref. 14 © 2014, American Chemical Society. **b)** Direct 3D printing process of QD-LEDs on a substrate. Adapted with permission from Ref. 14 © 2014, American Chemical Society. **c)** 3D-printed nanopixels. (Top: a 30°-tilt-view SEM image, bottom: optical photoluminescence (PL) image.) (Scale bar : 5 μm.) Adapted with permission from Ref. 20 © 2020, American Chemical Society. **d)** (Left)Homemade 3D printer. (right top) the OFET structure. (right under) 3D printed flexible OFETs on a glass tube. Adapted with permission from Ref. 21 © 2017, Royal Society of Chemistry.

력신호의 증폭 또는 발진 등을 작용할 수 있는 소자로 다른 전원 장치로부터 에너지를 얻어 작동을 하여 전원 장치와 구분이 된다. 능동전자소자의 예로는 다이오드, 트랜지스터 등이 있다. 입체적인 능동자유소자의 자유 형태로 제작하기 위하여 전자소자의 매끄러운 혼합 적층을 유지하는 것은 일반적인 마이크로 제조 공정기술의 고유 물질 비 호환성과 기하학적인 제한으로 문제가 되고 있었다.<sup>2,19)</sup>

이러한 문제에 대하여 프린스턴대학교(Princeton University) 마이클 맥알파인(Michael C. McAlpine)팀은 모든 성분들이 3차원 인쇄된 최초의 LED를 만들기 위해 QD(Quantum dot), 폴리머, 금속 나노입자들을 서로 연결된 구조로 인쇄할 수 있다는 것을 보여주었다. Fig. 2(a)는 능동 전자소자의 다이오드형인 QD-LED (Quantum Dot LED)로 직경 2mm의 5층으로 구성된다. 은 나노 입

자(Ag NPs)의 전도성 고리 안의 PEDOT:PSS로 구성된 투명한 양극층, N,N'-bis(4-butylphenyl)-N,N'-bis(phenyl)-benzidine(poly-TPD)으로 제조된 정공 수송층을 인쇄하고 CdSe/ZnS QD으로 구성된 발광층, 공용 갈륨인듐(EGaIn)의 환원 전극 층을 포함한다.<sup>14)</sup> QD-LED에서 활성층은 정공이 양으로 하전된 캐리어인 전자 및 정공 수송 재료층 사이에 위치한다.<sup>14)</sup> 인가된 전기장은 전자와 정공이 활성층으로 이동하여 재결합하여 광자를 방출한다.<sup>14)</sup> 투명 양극층과 정공 수송층을 둘러싼 전도성은 고리를 인쇄하고 200°C(은 고리) 및 150°C(다른 층)에서 가열 냉각(풀림)한 다음 용매 혼합물에 QD를 인쇄하여 활성층을 형성했으며, 용매 증발이 진행됨에 따라 재순환하는 유체 흐름이 QD의 커피 링 효과를 억제하여 비교적 균일한 활성층을 생성했다.<sup>14)</sup> 특히, 각 층은 층간 혼합을 최소화하기 위해 혼합 불가능한 용매를 사용하여 패턴화하였다.

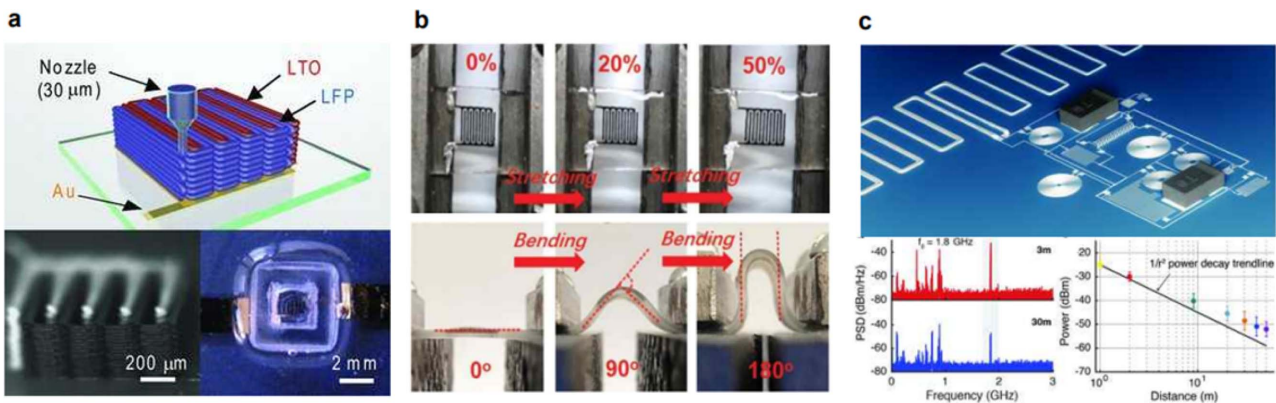
마지막으로 액체금속으로 구성된 음극 층을 인쇄하고 장치치를 실리콘 실란트에 포장하였다.<sup>14)</sup> 접근 방식의 유연성을 강조하기 위하여 QD-LED를 다양한 기판에 인쇄하였다. 보고된 QD-LED는 최상의 솔루션 처리 QD-LED보다 10~100배 낮은데, 전자 수송층의 소재(예, 산화아연 나노입자) 바꾸고 인쇄 공정을 더욱 최적화하게 된다면 소자 성능의 상당한 개선의 가능성이 보인다.<sup>14,19)</sup>

Fig. 2(b)는 Fig. 3(a)의 전기 와이어링이 수평과 수직으로 연결되는  $2 \times 2 \times 2$  LED 배열 등으로 다수의 색깔 3차원 적층 LED를 제작하였다.<sup>14)</sup> 또한 곡면에 QD-LED를 인쇄하여 3차원 인쇄 기술의 접근방식의 유연성을 강조하였다.<sup>14)</sup> 이 연구는 3D프린터만을 이용하여 기능적이고 내장형 능동 3차원 나노 전자소자의 직접적인 인쇄를 보여주었으며 반도체 나노입자들이 3차원 인쇄된 첫번째 예이다. 점도 범위가 좁은(순수한 소재의 10배 정도)잉크에만 적합한 잉크젯기술과는 달리 3차원 압출기반인쇄로 다양한 기능 물질의 폭넓은 구성과 점도의 재료를 패턴화 할 수 있는 응용성을 보여주었다.<sup>14)</sup>

Fig. 2(c)는 나노광자잉크를 이용하여 3D프린터로 글자를 출력하였다.<sup>20)</sup> 나노광자잉크를 만들기 위하여, 붉은색(650 nm)과 녹색(540 nm) CdSe/ZnS QD분말 및 청색(480 nm) ZnCdSe/ZnS QD 분말을 3개의 크실렌(xylene) 용매(농도 : 5 mg/mL)에 분산하였다.<sup>20)</sup> 각각의 QD용액은 용해된 폴리스티렌에 대한 QD의 20 wt%를 목표로 3개의 크실렌 용매에 용해시킨 폴리스티렌 용액(농도: 0.2 wt%)으로 희석되었다.<sup>20)</sup> 인쇄프로세스를 통해 적색 18개, 녹색 17개 및 청색 20개 나노 픽셀이 동일한 크기의 3차원 나노 와이어구조로 구현되었다.<sup>20)</sup> 상단의 그림은 인쇄된 나노 픽셀( $620 \text{ nm} \times 5 \mu\text{m}$ )의 수직독립형 나노와이어구조를 주사전자현미경(SEM: scanning electron microscope)으로 보여준다. 지금까지 픽셀의 크기를 줄여서 빛을 자연스럽게 처리하기 위해 노력해왔는데 나노 크기로 소형화될 때 제한된 볼륨으로 인하여 픽셀의 밝기가 제한되는

점이 있었다.<sup>20)</sup> 폴리머 나노와이어에 내장된 QD를 3차원 인쇄기술을 기반으로 나노 크기의 3차원 픽셀을 생산하는 방식을 보여주었다. 620 nm 직경에  $3 \mu\text{m}$  높이의 고해상도의 RGB (Red-Green-Blue) 픽셀을 구현하였다. 이러한 전략을 기반으로 MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems)소자, 트랜지스터, 태양전지, 광 다이오드 등 다른 인쇄소자들로 확장되는 연구가 보고되고 있다. 앞으로는 더 작은 소자들이 인쇄될 수 있도록 3차원 인쇄기술의 해상도를 증가시키고, 인쇄된 소자의 성능과 생산성을 향상시키면서 더욱 다양한 나노 크기 기능성 잉크와 소자들이 발전될 것으로 보인다.<sup>20)</sup>

3차원 인쇄기술을 이용한 트랜지스터를 위한 논문은 전계 효과를 이용한 방식,<sup>21)</sup> 전기화학적 반응을 이용한 방식 두가지로 구현되고 있다.<sup>22)</sup> Fig. 2(d)는 3차원 인쇄기술을 이용한 유기 전계효과 트랜지스터(Organic Field-Effect Transistor, OFET)이다. PET (polyester)필름에 PEDOT:PSS용액(1.5 wt% 수용액)을 게이트전극(gate electrode)을 수제 3D프린터(FDM방식 프린터와 마이크로 주사기펌프를 조합)로 3차원 인쇄하고 이온 겔(3블록 공중합체 PS-PMMA-PS ( $M_{PS} = 4.3 \text{ kg mol}^{-1}$ ,  $M_{PMMA} = 12.5 \text{ kg mol}^{-1}$ ,  $M_w = 21.1 \text{ kg mol}^{-1}$ ))을 게이트 전극에 유전체(dielectric) 층으로 인쇄하였다.<sup>21)</sup> 그 후, 고분자 용액(1,4-bis(3-phenylquinoxalin-2-yl) benzene을 DPP 및 isoindigo와 중합)을 유전층 상부에 활성층으로 인쇄하고 소스 및 드레인 전극을 PEDOT:PSS용액(poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate)을 사용하여 인쇄하였다.<sup>21)</sup> 이렇게 인쇄된 유기 전계효과 트랜지스터는 온/오프 비율이  $10^3$ 이었고, 좁은 밴드 갭과 높은 결정성을 확보하여 1.31 V의 임계 전압이 측정되었다.<sup>21)</sup> 그 외에도 기존의 잉크젯 인쇄 기술으로 유연한 유기 트랜지스터를 3차원 모놀리thic(monolithic) 인쇄함으로써 트랜지스터 밀도의 기술 확장을 달성하여 3개의 보완 트랜지스터의 3차원 스택(stack)을 통하여 3차원 로직 어레이의 가능성을 보고



**Fig. 3.** 3D printed power supply devices. **a)** 3D interdigitated microbattery architectures (3D-IMA) followed by sintering and packaging. Adapted with permission from Ref. 13 © 2013, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. **b)** Electrochemical performance of microsupercapacitor under stretching (0% ~ 50%) and bending. Adapted with permission from Ref. 25 © 2020, John Wiley and Sons. **c)** Wireless transmitter clocked by oscillator. 1.8 GHz RF transmitter on glass. Adapted with permission from Ref. 16 © 2017, John Wiley and Sons.

하였다.<sup>23)</sup>

다음으로 유기 전기화학 트랜지스터(Organic electrochemical transistor, OECT)는 기존 트랜지스터와 유사하며 소스, 드레인, 게이트가 존재한다. OECT는 3차원 인쇄 기술로 제작할 수 있는 단순한 설계, 낮은 작동 전압, 크고 유연한 기판과의 호환성, 이온 및 전자 전하 캐리어의 장점을 가지고 있어 기본 로직 회로(logic circuit), 스마트 텍스타일(Smart Textile), 일렉트로크로믹(electrochromic) 디스플레이 백플레인(backplane), 능동 매트릭스 물리적 센서회로에서 활용된다.<sup>22)</sup> 양이온 유형 및 농도 검출을 위한 3차원 인쇄 OECT는 P형 고갈 모드 OECT 구조로 제작을 단순화하는 인버터(inverter)를 설계하여 PET기판에 은 전극과 PEDOT:PSS 채널을 인쇄하였다. 이 장치는 HI 및 LOW수준인 두 레벨을 이용하여 센서로 사용이 가능하다. 최대 650 mV/dec의 양이온 검출을 위한 고감도 성능을 보여주었고, 이는 보고된 다른 논문보다 5배 높다. 수십분 동안 이온의 농도는 이온선택적 전극(ISE, Ion Selective Electrode)에 의해 결정되었는데, 이 센서는 정확하지만 종종 크고 비용이 많이 들며 큰 샘플 크기가 필요하여 인체 내부에 넣는 센서로는 적합하지 않았다. 소개한 OECT는 이온 이동성에 따른 양이온 유형을 검출하여 바이오 센서로서의 활용성을 보여주었다.<sup>22)</sup>

또 다른 사례로는 3차원으로 구현한 스크린프린팅 OECT이다.<sup>24)</sup> 소스-드레인-게이트 전극이 동일한 평면에 측면 설계 트랜지스터에서 PEDOT:PSS는 활성층과 소스-드레인, 게이트 전극을 형성한다.<sup>24)</sup> 탄소 층은 PEDOT:PSS 전극이 손상되는 것을 방지하고 최소한의 저항성 상호 연결을 보장하며, 물 기반의 CaCl<sub>2</sub> 함유한 이온 젤이 유전체 역할을 한다.<sup>24)</sup> I<sub>ON</sub>/I<sub>OFF</sub> 전류 비가 8000에 상응할 때, 온(ON) 전류가 게이트 전압이 V<sub>G</sub> = 0 V 일 때 I<sub>ON</sub> = -0.32 mA이고, 오프(OFF) 전류가 V<sub>G</sub> = 1.5 V일 때 I<sub>OFF</sub> = -39 nA 로 보고되었다.<sup>24)</sup> PEDOT은 외부 전기장(V<sub>G</sub>)에 의해 유도된 전도 상태 사이를 전환하여 가역적으로 환원(도핑) 및 산화(도핑)될 수 있는데 이러한 상태는 유기 전기 화학 트랜지스터의 오프 및 온 상태를 결정한다.<sup>24)</sup> 게이트와 채널 사이에 적용된 전기장에 따라 전해질을 통해 양으로 하전된 이온(M<sup>+</sup>)의 흐름에 의해 전자 전류(I<sub>G</sub>)가 유도된다. 산화환원활성종인 PEDOT:PSS의 양에 따라 총 전류가 달라지는 것을 확인하였다.<sup>24)</sup>

능동소자의 경우에는 3차원으로 구현하는 방식이 3차원 인쇄를 통하여 능동 소자를 구현하는 방식<sup>14,20-22)</sup>과 기존의 제조 방식(스크린프린팅, 잉크젯프린팅 등)<sup>23,24)</sup>을 3차원으로 구현하여 기술적 확장을 보고하는 방식을 확인하였다. 앞으로 3차원 인쇄 기술 및 인쇄 가능한 전자 재료의 개선으로 인해 3차원 인쇄기술을 유연하고 착용 가능한 전자장치의 제조에 널리 사용될 것이다. 3차원 인쇄 기술을 통해 특정 응용분야에 대한 빠른 제작 및 사용자 지정 설계가 가능하다.

### 2.3. 3차원 인쇄기술을 이용한 전원공급장치

소형전자기기들이 많이 양산되면서 그에 상응할 전원 공급장치의 수요가 생기게 되었다. 전원공급장치를 분류하자면 에너지저장장치, 에너지수확장치, 전원전달장치가 있다. 3차원 인쇄 기술은 전원공급장치를 소형으로 디자인하는데 제한이 없고, 또한 재료 절감과 제조 시간의 단축으로 상대적으로 공정 비용이 낮다. 에너지저장장치 중에 3차원 인쇄 배터리는 전극용 프린팅 기능성 잉크 또는 필라멘트를 제조하고, 3차원으로 디자인을 하여 이를 토대로 적층 레이어들로 슬라이싱(Slicing)하여 프린터로 적층공정을 하며 필요시 후처리(소결, Sintering)를 한다.<sup>8,9,13)</sup> 이후 전해질을 포함하는 등의 패키징을 하게 되는 것이 배터리를 만드는 과정이다. Fig. 3(a)는 3D 리튬이온 마이크로배터리이다.<sup>13)</sup> 유리 기판에 전류 콜렉터(집전 장치)는 Au를 사용하고 충방전사이클 시 낮은 부피 변화와 열 안정성이 있는 산화 전극은 LTO기능성 잉크(Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, 50 nm 57 wt% solids; Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 4.5 g, 탈 이온물, 에틸렌글리콜, 글리세롤, 3.5 wt% 수성 히드록시 프로필 셀룰로오스 용액, 3 wt% 수성 히드록시 에틸 셀룰로오스), 환원 전극은 LFP기능성 잉크(LiFePO<sub>4</sub>, 180 nm, 67 wt% solids; LiFePO<sub>4</sub>, 3 g, DI 물, 에틸렌글리콜, 글리세롤, 3.5 wt% 수성 히드록시 프로필 셀룰로오스 용액, 3 wt%, 수성 히드록시 에틸 셀룰로오스)로 출력한 후 아르곤가스에서 2시간동안 600°C에서 어닐링한다.<sup>13)</sup> 얇은 벽의 PMMA (Polymethyl methacrylate)를 레이저로 절단하여 배터리 주변에 배치하고 150°C에서 경화된 PDMS젤로 밀봉하여 패키징하였다.<sup>13)</sup> 적층된 배터리의 이미지를 살펴보면 출력된 층들의 계면이 잘 결합되어 있다는 것을 보여준다. 패키징된 3차원 상호 교차된 마이크로배터리는(2.1 mm × 2.1 mm × 1.5 mm)로 마이크로배터리와 액체 전해질을 포함하는데 기존의 배터리에 비하여 3차원 전극들 간의 높은 중형 비와 더 높은 면적 부하로 인해 면적과 부피에 대한 높은 에너지밀도를 가지게 된다.<sup>13)</sup> 또한 전극 구조가 3차원이라 이온이나 전자의 확산 경로가 짧아져 더 높은 출력 밀도를 가지게 된다. 최초의 3차원 인쇄 배터리는 전자가 움직일 수 있는 공핍층의 제한으로 인하여 8층구조와 16층구조의 LFP전극의 전류 밀도가 같게 나오는 제한이 있었다.<sup>13)</sup> 이는 5년후 전극 물질이 같으나 커런트 콜렉터(current collector)를 유리상 탄소(glassy carbon)으로 하고 UV 경화 패키징하여 최초의 경우보다 4배의 성능을 가진 배터리로 전류 밀도가 0.14 mA/cm<sup>2</sup>일 때 면적 용량이 4.45 mAh/cm<sup>2</sup> (17.3 Ah/L에 상응) 발표하였다.<sup>8)</sup> 양 전극의 두께를 두껍게 하여 에너지 용량을 늘렸는데 두꺼운 전극으로 인하여 이온 간 전자간 이동이 제한될 것을 예상하여 이온 간 이동을 증진하기 위하여 커런트 콜렉터 표면에 수직으로 내부 오픈 채널을 만드는 디자인으로 성능향상을 이루어냈다.<sup>8)</sup> 배터리의 성능을 향상하기 위한 기능성잉크와 디자인은 현재까지도 계속적으로 연구되고 있다. 이외에도 3차원 인쇄

아연이온전지로서 전지의 성능을 가지는 반지 모양, 알파벳 모양을 구현함으로써 3차원 인쇄기술의 기하학적 모형에 대한 자유롭게 제작이 가능함을 보여주었다.<sup>9)</sup>

에너지 저장장치 중에 다른 하나로 슈퍼캐패시터 (supercapacitor)를 3차원 인쇄한 사례도 있다.<sup>25)</sup> Fig. 3(b)는  $Ti_3C_2T_x$  MXene 나노 시트, 이산화망간 NW (nanowire), 은 NW, 풀러렌 (fullerene)으로 구성된 유사 플라스틱 나노 복합 겔의 3차원 인쇄 및 단 방향 동결의 전략을 도입하여 벌집모양의 두꺼운 다공성 교차전극으로 신축성 있는 소형 슈퍼캐패시터를 구성한다.<sup>25)</sup> 상호작용하는 재료의 특성과 함께 전극을 두껍게 하고, 3차원 다공성 전도성 스캐폴드(scaffold)를 사용하여 활성 재료의 더 높은 부하, 더 큰 계면 영역 및 훨씬 향상된 면적 에너지 및 전력 밀도를 위한 더 빠른 이온 수송을 달성한다.<sup>25)</sup> 폴리머 겔 전해질이 있을 때 3차원 인쇄된 마이크로 슈퍼캐패시터는 10 mV/s의 스캔속도에서 216.2 mF/cm<sup>2</sup>의 면적 정전 용량을 달성하며 최대 50%까지 늘이고 1000번 늘이기/풀립 순환 후에도 안정적으로 유지된다.<sup>25)</sup> 19.2  $\mu$ Wh/cm<sup>2</sup>의 뛰어난 면적 에너지 밀도 및 58.3 mW/cm<sup>2</sup>의 전력 밀도를 나타내어 기존의 신축성 마이크로 슈퍼캐패시터 성능을 능가하는 것을 보여주었다.<sup>25)</sup>

전원공급장치 중 에너지 수확장치에는 압전(piezoelectric), 열전(thermoelectric) 소재를 이용한 기능성잉크로<sup>26,27)</sup> 기기를 출력하거나 마찰 전기를 에너지로 이용하는 방법<sup>28)</sup> 등 다양하게 시도되고 있다. 3차원 인쇄기술과 에너지 수확 장치의 결합은 지속 가능한 프로세스를 통해 지속 가능한 에너지 장치를 구현하여 이상적인 자원 활용 전략을 실현할 수 있다.<sup>29,30)</sup> 그 중 열전발전기는 소재의 발전으로 효율성이 향상되었으나 구조의 제한으로 인하여 열 접촉이 비효율적이었다. 3차원 인쇄 기술로 열전발전기가 열원의 형상에 맞는 적절한 크기와 모양으로 효율적인 열 접촉으로 전력 출력을 할 수 있게 되었다.<sup>27)</sup> N<sub>2</sub> 환경 내 불침묵을 통해 Bi<sub>0.4</sub>Sb<sub>1.6</sub>Te<sub>3</sub> 및 Bi<sub>2</sub>Sb<sub>2.7</sub>Se<sub>0.3</sub>의 조성을 갖는 p형 및 n형 열전(TE)분말(<45  $\mu$ m) 2 g과 Sb<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> ChaM 바인더(2 ml 에탄티올, 8 ml의 에틸렌디아민, 0.32 g의 Sb분말, 0.68 g의 Te분말로 보라색 용액을 만든 후 이 용액에 아세트니트릴 40 ml를 첨가하여 ChaM 바인더를 침전 시킨 후 원심 분리한 ChaM 바인더를 진공 하에 건조)을 2 g의 글리세롤에 분산시키고 균질화한 후 알루미늄 파이프 표면에 밀착할 수 있도록 반원 반지모양으로 3차원 인쇄 기술로 제작하였다.<sup>27)</sup> 폐열을 기존보다 더 효율적으로 에너지원으로 사용할 수 있는 가능성을 보여준 셈이다.<sup>27)</sup> 또 다른 예는 마찰 전기 메커니즘을 기반으로 하는 3차원 인쇄한 출력물로 이루어진 에너지 수확장치이다.<sup>28)</sup> 마찰 전기 나노 발전기(TENG, Triboelectric electric nanogenerator)는 전극층, 마찰전층, 케이스 패키지를 각각 3차원 인쇄하여 조립하고 제작한다. 이 TENG는 231 V의 RMS (root-mean-square) 개방 회로 전압, 18.9  $\mu$ A의 RMS 단락 전류 및 2.13 mW의 최대

RMS 전력을 제공하여 일반 무선 전자 시스템에 전력을 공급하는 성능을 보여주었다.<sup>31)</sup> 이 외에도 실리콘 고무 기반 점탄성잉크를 이용하여 알루미늄 호일에 압출하여 마찰 전기 패턴을 제조하였는데 이 연구에서는 마찰 전기 전원수확장치가 124 V의 출력 전압과 608.5 mW/m<sup>2</sup>의 해당 최대 전력 밀도를 산출할 수 있음을 보여준다.<sup>32)</sup>

세번째로는 전원전달장치로 무선전력전송방법이 있는데 라디오주파수 등의 전자기파를 이용하여 전자기유도 현상으로 전력을 생산하는 방식이다. 나노입자잉크로 무선주파수 안테나를 제작하여 트랜지스터와 결합하여 기가 헤르츠(GHz)를 생성하는 무선전력공급을 하는 발전이 있어왔다. Fig. 3(c)는 3차원 인쇄한 Colpitts 오실레이터(oscillator)로 클러킹된 1.8 GHz RF송신기이다. 오실레이터는 A급 전력증폭기를 통해 3차원 인쇄한 다이폴안테나(dipole antenna)를 구동한다.<sup>16)</sup> 전력증폭기는 3차원 인쇄된 수동 소자를 양극 접합 트랜지스터와 이질적으로 통합하여 구성된다.<sup>16)</sup> 스펙트럼 분석기에서 송신기에서 3 m와 30 m 떨어진 거리의 수신기안테나에서 측정된 전력스펙트럼 밀도를 보여준다.<sup>16)</sup> 현재 기능성잉크를 개발하여 규모의 구조 면에서 공정이 자유로운 면을 강조하면서 에너지원들이 만들어지고 있다. 전자기기에서 필요한 전력 규모와 기기에 들어갈 수 있는 크기 제한에 따라 설계될 수 있는 수준으로 발전한다면 3D프린터와 기능성 소재를 가지고 전원장치를 자유롭게 만들 수 있을 것이다.

#### 2.4. 3차원 인쇄기술을 이용한 센서 응용기술

3차원 인쇄가 가능한 소재와 3차원 인쇄 기술이 발전함에 따라 전자소자들의 응용 버전이 보고되고 있다. 센서를 3차원 인쇄 기술로 제작하면 전통적인 제조방법과 비교하여 다양한 타겟에 맞춤형 구조로 기하학적 구현이 가능하다. 미세가공기술에 비하여 맞춤형 생산이 가능하고, 단일 인쇄 도구를 통하여 유기/무기/바이오/전도/반도체 재료를 모두 통합할 수 있으며, 장치를 3차원 형상과 자유형 및 움직이는 표면에서도 제작이 가능하다.<sup>5,6)</sup> 또한 재료비의 절감과 제품의 재고관리비용, 물류운송비용 등 경제적인 이점도 있다. 3차원 인쇄된 전자소자는 3차원으로 표면적이 더 커지고 측정할 수 있는 다른 상용 제품에 장착하기 위해 센서의 형상을 쉽게 변경할 수 있다.<sup>33)</sup>

3차원 인쇄 센서는 물리적 센서, 바이오 센서 및 화학 센서로 분류할 수 있다. 물리적 센서는 물리적 효과로 인한 물리량 변화를 감지한 다음 이를 전기신호(예: 저항 변화, 정전용량 변화, 인덕턴스 변화, 전압 또는 전류 변화 등)로 변환하여 취급 및 모니터링을 용이하게 하는데 사용된다.<sup>33-38)</sup> 거칠거나 다공성의 표면도 3차원 인쇄기술로 극복하고<sup>5,6)</sup> 인쇄 전도성 잉크에 필요한 열 소결 공정은 3차원 인쇄 고분자구조를 저하시키는 문제를 해결할 수 있다.

Fig. 4(a)는 고성능 폴리머 기반 광검출기이다.<sup>38)</sup> 광 검출기가 어레이로 반구 표면 위에 장착되어 광원의 위치에 따라 각 센서들에 투영된 다른 빛 세기를 재구성하여 광원의 위치를 유추할 수 있다.<sup>38)</sup> 재료 설계는 P3HT와 PCBM 혼합물을 광활성층으로 사용하였고 PEDOT:PSS를 투명 양극, 상호 연결에 있어서는 은 나노입자잉크로 사용하고 실리콘을 전기절연층으로, 공용 갈륨 인듐 (EGaIn) 액체 금속은 음극으로 사용하였다.<sup>38)</sup> 은 나노입자가 기판에서 링 형태로 인쇄한 후 120°C에서 가열 냉각한 후, PEDOT:PSS방울은 은 나노 입자 링에 인쇄하여 형태를 유지하고 120°C로 경화하고, P3HT:PCBM잉크를 인쇄하여 고효율을 위한 농도를 최적화하였다.<sup>38)</sup> 양극 간에 우수한 전기 절연을 보장하기 위하여 실리콘을 인쇄하고 EGaIn 금속 잉크는 음극으로 인쇄하며 최종 인쇄된 광 검출기는 UV경화형 코팅용액으로 봉지막을 제작하였다.<sup>38)</sup> 반도체 폴리머잉크로 인쇄하고 광 검출기의 활성층에 최적화되어 25.3%의 양자 수율을 달성한다.<sup>38)</sup> 유연한 기판(PET필름)과 반구형 표면에 직접 연결된 광 검출기를 3차원 인쇄하여 고감도, 넓은 시야 각의 이미지를 최소 이미지 왜곡으로 감지하게끔 광 검출기에 있는 센서의 각각의 값들이 배열에 통합되게 하였다.<sup>38)</sup> 이러한 방식은 단일플랫폼에서 광학적으로 결합된 광 검출기와 발광다이오드로 구성된 다기능통합장치를 새롭게 보여준다.<sup>38)</sup>

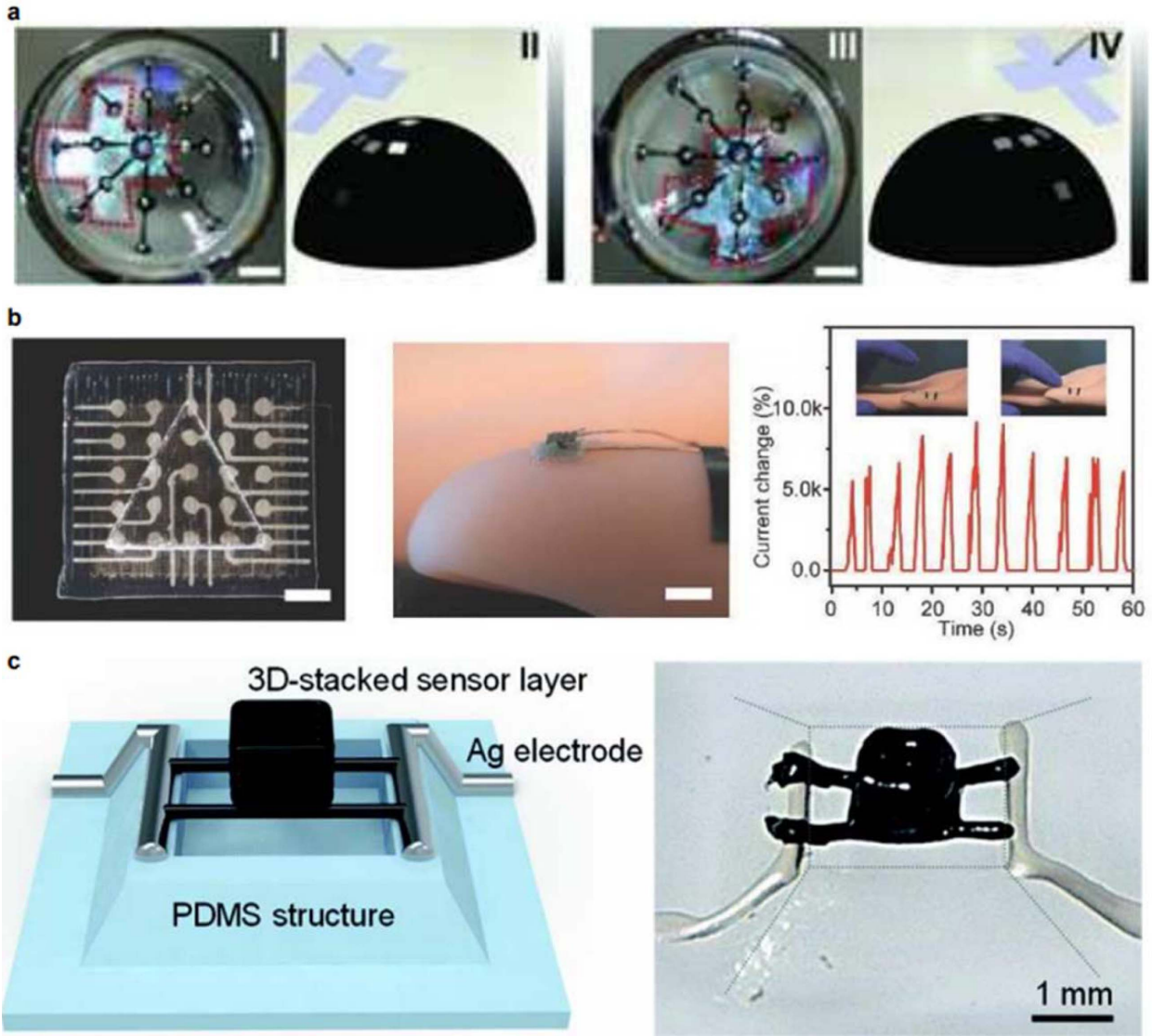
Fig. 4(b)는 신축성이 있는 촉각센서이다.<sup>34)</sup> 다중 재료, 다중 스케일 및 다기능 3차원접근방식으로 자유형표면에 3차원 촉각 센서를 제작하였는데 맥박모니터링, 손가락 동작(누르기, 구부리기), 사람의 움직임을 감지하고 구별이 가능하다.<sup>34)</sup> 실리콘잉크는 드래곤 스킨(Dragonskin)10 경화지연제 파트 A와 B, Thi-Vex실리콘 증점제, Slo-Jo 플래티넘 실리콘 경화지연제로 구성되었다.<sup>34)</sup> 은/실리콘잉크는(68, 75, 80 wt%)는 드래곤 스킨 10 파트 A와 B는 1:1로 혼합하였고 용매는 DCM (10 wt%)로 준비되었다. 희생 잉크는 40 wt% Pluronic F127을 초 여과수와 혼합하여 지지층을 인쇄한 후에 장치를 물에 담가 제거했다.<sup>34)</sup> Aerotech사의 AGS 1000로 프린팅을 수행하였고 소프트웨어 Slic3R에 의해 생성된 G코드를 통해 제어되었다.<sup>34)</sup> 센서는 3분 이내 인쇄하고 실온에서 경화를 하였으며 얇고 유연한 케이블을 붙여 테스트하였다.<sup>34)</sup> 손가락 끝에 인쇄한 후에 촉각 센서의 감지 동작을 조사하였는데 출력 신호의 진폭은 5초의 시간간격으로 적용된 가압력에 따라 달라졌다.<sup>34)</sup> 약한 손가락 누름( $\approx 100$  kPa)을 적용하면 센서는 5000%의 전류 변화로 응답했고, 강하게 누르면( $\approx 400$  kPa) 신호 강도가 8000%로 증가했다.<sup>34)</sup> 이러한 구별 가능한 응답 신호는 또한 사람의 움직임을 감지하고 구별하는 장치의 기능을 보여주었는데, 이는 사람의 움직임에 대한 센서의 기계적 유연성과 장치 확장성, 장치의 높은 성능 유지로 인하여 웨어러블 센서로 발전가능성을 보여주었다.<sup>34,39)</sup> 그 외에도 고감도 촉각으로 신축

성 정전용량센서를 제작하였다.<sup>37)</sup> 탄소나노튜브-PDMS 잉크와 탄소나노튜브-Ecoflex잉크를 만드는데 복합벽 탄소나노튜브(MWCNT, multi-walled carbon nanotube)에 에탄올과 에틸아세테이트를 섞고, 각각 PDMS베이스, Ecoflex A제에 혼합한 후에 에탄올과 에틸아세테이트를 증발시키고 프린팅 직전에 각각 PDMS경화제, Ecoflex B제를 넣어서 유리 기판에 출력한다.<sup>37)</sup> 인쇄된 패턴은 80°C에서 경화되고 은 나노 와이어 용액을 리드 근처에 떨어뜨려서 전기 측정을 위한 접촉을 개선했다.<sup>37)</sup> CNT-PDMS 패턴의 경우 PDMS전구체를 패턴에 붓고 80°C에서 가열하였고 CNT-Ecoflex패턴은 실온에서 경화한 후 신축성 인장 센서를 얻었다.<sup>37)</sup> 인장 센서의 안정성을 시험하기 위해 100주기동안 이완과 50% 인장을 반복하였으나 측정된 커패시턴스가 변동이 거의 없고 안정적이었다.<sup>37)</sup> 같은 소재로 신축성 이중와류센서로 제작하여 전기화학센서로 응용하였는데 커패시턴스의 변화로 NaCl수용액에 대하여  $1 \times 10^{-6}$  M의 낮은 검출 한계를 보여주었다.<sup>37)</sup>

Fig. 4(c)는 압력센서이다. 압력을 측정하는 방법은 대표적으로 2가지 방법이 있는데 미리 형성된 구조를 다공성 복합체로 만들어서 전도성 프레임워크에 적용된 압력함수로 전도성 경로를 조절하여 전류 변화를 관찰하는 방법이 있고, 두번째로는 신축 센서로 외부의 압력이 가해지면 내부의 신축 전도성 네트워크는 압력에 따라 저항이 비례적으로 증가하는 것을 관찰하는 방식이 있다.<sup>36)</sup> 측정가능범위의 정확한 측정을 위하여 커패시턴스를 측정하는 방식을 선택하였고 보다 넓은 범위를 측정하기 위하여 압전저항의 방법인 두번째 방법을 채택하였다. 두번째 방법은 고무의 점탄성 특성때문에 히스테리시스 현상이 있어 센서의 민감성이 떨어진다는 단점이 있었는데 이를 극복한 압력센서를 제조하였다. 이 압력센서는 산화 흑연과 아미노기-기능화된 카본나노튜브의 비율을 조정하여 최적화된 압저항성능을 가진 하이브리드 카본을 제조하고 계면활성제 매개 고무를 활용하여 비이온성 양친매성 계면활성제를 최적화하여(30%) 사용하고 기존의 문제점인 히스테리시스를 극복하여 민감성을 확보하였다.<sup>36)</sup>

화학 센서에는 전기화학적 방법(전위, 전류, 저항)과 광학 방법(흡수성, 착색법, 형광, 발광 및 반사용법)을 통한 여러 트랜스듀션(transduction) 메커니즘을 통해 화학반응을 모니터링한다. 화학센서 제조에 3차원 인쇄 기술 기반으로 정밀한 디테일을 갖춘 단일형 커널 감지장치를 달성할 수 있다.<sup>33)</sup> 그 예로 Hong팀은 중금속 이온을 향한 우수한 전기화학적 검출 특성을 제시하고 중금속 이온의 실시간 분석을 제공할 수 있는 미세 유체 전기화학센서를 보고했다. 미세 유체세포에서 속도프로파일을 위한 모델의 원하는 형상을 FEM을 이용하여 구축 및 최적화하였다. 미세유체세포의 전극은 유연한 스크린 인쇄 전극(SPE)이었다. 이 새로운 감지 메커니즘은 감도, 안정성 및 재현성과 같은 SPE기반 센서의 문제를 해결했다.<sup>40)</sup>





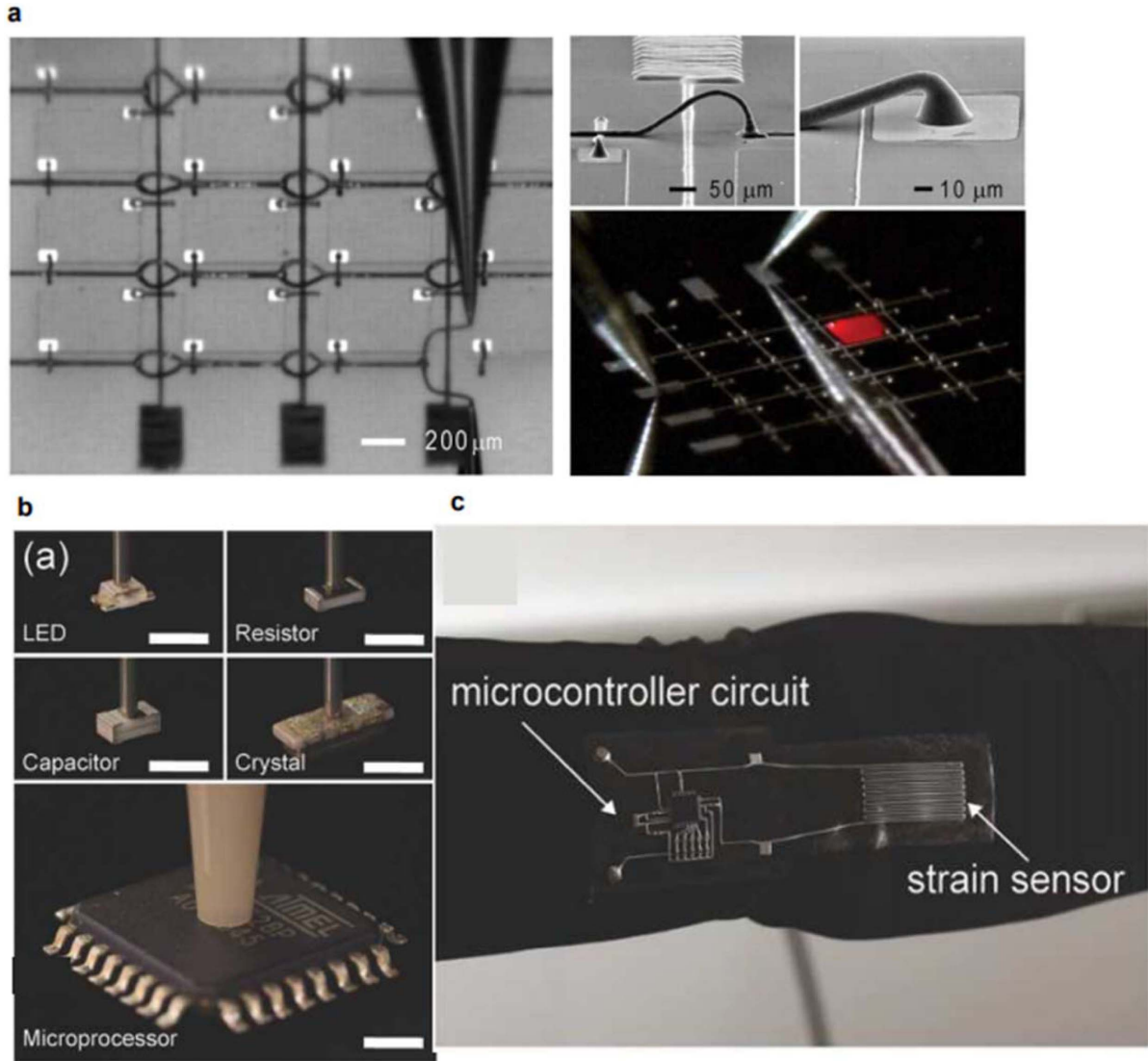
**Fig. 4.** 3D printed sensors. **a)** The hemispherical photodetector array as an image sensor. The range of the greyscale bar is from 0 (black) to 300 nA (white). (Scale bar: 5 mm). Adapted with permission from Ref. 38 © 2018, John Wiley and Sons. **b)** (Left) A triangular glass object placed on the tactile sensor (5 × 5 pixel). (Scale bar: 2 mm.) (middle) Photograph showing the conformally printed sensor on a finger. (Scale bar: 4 mm.) (right) Current change during pressing the tactile sensor printed on a finger. Adapted with permission from Ref. 34 © 2017, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. **c)** A single unit of 3D hysteresis-less stretchable piezoresistive printed pressure sensor. Adapted with permission from Ref. 36 © 2019, The Royal Society of Chemistry.

바이오센서는 살아있는 세포와 전자 성분을 포함하는 생체공학센서이다. 일반적으로 바이오센서는 효소, 항체 등 고전적인 인식 원소를 사용하거나 인체의 일부 기능을 모사하려는 시도도 있다.<sup>33)</sup> Mannoort팀에서 음향 및 초음파센서로서 인간의 귀의 기하학적 모방을 사용하여 세포 시드 하이드로 겔 매트릭스의 3D프린팅을 통해 생체공학 귀를 생성하였다.<sup>41)</sup> 은 나노 입자는 인쇄과정에서 주입되어서 달팽이관 모양의 전극으로 제조되고 귀로 조립되었다.<sup>41)</sup> 코일 안테나의  $S_{21}$ (전방 전송 계수)파라미터를 분석하고 확장 주파수 스펙트럼을 통해 신호를 전송하는 것이 보고되었다. 인쇄된 귀의 구조는 무선 주파수 수신을 위한 향상된 청각 감지를 나타내는 것으로 보고되었다.<sup>41)</sup>

3차원 인쇄 기술로 구현한 센서는 높은 감도의 장점을 가지고 있으며 상용 제품에 맞게 다양한 구조를 인쇄하고, 상업용 센서와 통합할 연구플랫폼의 인쇄가 가능하다.<sup>5,33)</sup> 3차원 인쇄 기술을 이용한 센서는 단일센서에서 높은 수준의 감도와 처리량을 처리해야 하는 진단 및 치료 응용분야에 활용될 잠재력이 있는 것으로 판단된다.<sup>33,42)</sup>

**2.5. 회로 전극 및 인터커넥트 응용**

표면실장 전자 소자와 3차원 인쇄 기술을 이용한 연결하는 하이브리드 기판에 대한 논문도 보고되고 있다. Fig. 5(a)는 은 마이크로 전극으로 하버드대학교 제니퍼 루이 시스템에서 DIW (Direct Writing)방식으로 은 나노 잉크를



**Fig. 5.** 3D printed interconnection in PCB and 3D printed hybrid soft electronics. **a)** (Right) Patterning process of silver interconnects on 4-4 LED chip array. (Left) A silver interconnect arch printed over an electrode junction (Right top) a photograph of light emission from a single LED pixel under an applied voltage. (right bottom). Adapted with permission from Ref. 11 © 2009, American Association for the Advancement of Science. **b)** Images of pick-and-place process. (scale bar = 2mm). Adapted with permission from Ref. 44 © 2017, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. **c)** Image of 3D printed strain sensor and microcontroller circuit. Adapted with permission from Ref. 44 © 2017, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

3차원 인쇄하였다.<sup>11)</sup> 하나의 회로에서 다른 회로 요소로 신호를 전달하는 전극은 광전자장치에 활용되는데 은 마이크로 전극패터닝을 하였다.<sup>11)</sup> 고농도 은나노입자잉크 ((질산은, 전극제) + (폴리아크릴산, 캡핑제) + (디에탄올아민, 환원제) + (에틸렌글리콜, 습윤제))는 와이어본딩이 가능하고 태양전지, 발광다이오드 배열을 위한 스페닝 인터랙트도 시연하였다.<sup>11)</sup> 이외에도 필라멘트를 구조화하여 회로 간 연결하거나<sup>3)</sup> 전도성 있는 고분자물질을 이용하여 회로 간의 연결을 도모하는 논문들이 보고되고 있다.<sup>43)</sup>

Fig. 5(b)는 3차원 인쇄한 하이브리드(Hybrid) 기판구조이다.<sup>44)</sup> 통합적층 제조 플랫폼 내에서 전도성 및 유전체 탄성 재료의 잉크 출력물로 회로를 연결하고 전자부품의 PnP (Pick&Place)를 결합한 방법이다.<sup>44)</sup> 전도성잉크는

TPU를 N,N-DMF(디메틸포름아미드)에 섞고 은 조각 99.95%, 2-5 μm를 첨가한다.<sup>44)</sup> 절연 잉크는 TPU를 N,N-DMF (Dimethylformamide) 비율 1과 THF (tetrahydrofuran) 비율 4로 구성하였다.<sup>44)</sup> 인쇄 후 각 레이어를 80°C에서 경화하였고 진공기능으로 노즐에 빈 주사기를 사용하여 다양한 표면 실장 전기 소자의 자동으로 기판에 배치하고 인쇄된 전도성 트레이스를 통해 소프트 전자장치를 생성하는 방법으로 원하는 위치에 원하는 전자회로를 설계하였다.<sup>44)</sup> 이를 통하여 발바닥에 맞는 센서 배열을 인쇄 제작하는 응용 버전을 보이기도 하였다.<sup>44)</sup> PnP (Pick & Place)방법을 이용하여 표면실장부품과 회로를 3차원 인쇄 기술로 만드는 방식은 산업에 실제로 활용되고 있다. 잉크의 전도도와 봉지막에 대한 연구로 향상된다면 다양한 PCB를 만드는 데 있어 유연한 대치가 가능하여 설비

구조도 간결하게 변화될 수 있을 것이다.

### 3. 결 론

지금까지 3차원 인쇄 기술을 이용한 전자소자의 연구 동향에 대하여 알아보았다. 최근에는 나노 규모의 3차원 인쇄 기술을 하기 위하여 에어로졸 기술<sup>45)</sup>을 이용하거나 근거리 전기방사기술<sup>46)</sup>을 활용하여 초소형 전자소자를 만들기 위한 연구가 진행 중이다. 현재까지는 노즐들의 정렬(align) 문제가 있고, 반도체 소재를 나노 크기로 3차원 인쇄하는데 제약이 있다. 3차원 인쇄 기술은 설계에서 제작이 신속하게 가능하고 마스크나 금형없이 복잡한 구조를 출력할 수 있으므로 다품종 생산이나 맞춤형 제품을 제작하는 분야에 유망하다. 대표적인 예가 사람의 인체 내에 들어가는 의료용 전자소자인데 고유한 인체의 일부에 전자소자를 내재하여 건강상태 모니터링, 결손이 있는 기관에 대한 바이오센서 등 다양한 기능을 요구할 수 있다. 소재와 3D프린터가 있을 경우 One-stop으로 조립 없이 전자소자 쌓기(stacking), 회로 연결(interconnection), 봉지막(encapsulation)을 제작하여 전자소자 3차원 인쇄가 가능하다.

하지만 현재까지 3차원 인쇄 기술은 페이스트가 인쇄된 부분의 위치마다 균일도가 고르지 않아서 전체 연결에 걸쳐서 전도도가 저하되어 동일한 성능이 나오지 않아 기계적 결합이 있을 수 있다. 또한 적층 공정 간에 층간의 접착(Adhesion)문제는 기계적 신뢰성에 직결된 문제이므로 대책이 필요하다. 또한 노즐에 동일한 압력과 속도로 3차원 인쇄를 할 시에도 재현성이 부족하다는 점 또한 3차원 인쇄 기술이 극복해야 할 과제이다. 이러한 현상을 위하여 3차원 인쇄 전자소자만의 특성에 대한 신뢰성 평가 및 패키징기술 발전이 필요할 것으로 보인다.<sup>47)</sup>

### 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019 RIC1C1004232).

### 참고문헌

1. M. Vaezi, H. Seitz, and S. Yang. "A review on 3D micro-additive manufacturing technologies." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67.5-8 (2013): 1721-1754..
2. W. Gao, et al. "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering." *Computer-Aided Design* 69 (2015): 65-89.
3. G. Loke, et al. "Structured multimaterial filaments for 3D printing of optoelectronics." *Nature communications* 10.1 (2019): 1-10.
4. D. Espalin, et al. "3D Printing multifunctionality: structures

- with electronics." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 72.5-8 (2014): 963-978.
5. Z. Zhu, H. S. Park, and M. C. McAlpine. "3D printed deformable sensors." *Science advances* 6.25 (2020): eaba5575.
6. Z. Zhu, et al. "3D printed functional and biological materials on moving freeform surfaces." *Advanced Materials* 30.23 (2018): 1707495.
7. S. J. Hong, J. W. Kim, C. J. Han, Y. S. Kim, T. W. Hong, "Trends on Technology of Eco-friendly Metal and Ceramic Nanoparticle Inks for Direct Printing", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 17(2), 1-9, 2010.
8. T. S. Wei, et al. "3D printing of customized li-ion batteries with thick electrodes." *Advanced Materials* 30.16 (2018): 1703027.
9. C. H. Kim, et al. "High-power aqueous zinc-ion batteries for customized electronic devices." *ACS nano* 12.12 (2018): 11838-11846.
10. C. W. Hull, "The birth of 3D printing." *Research-Technology Management* 58.6 (2015): 25-30.
11. B. Y. Ahn, et al. "Omnidirectional printing of flexible, stretchable, and spanning silver microelectrodes." *Science* 323.5921 (2009): 1590-1593.
12. S. Y. Wu, et al. "3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors." *Microsystems & Nanoengineering* 1.1 (2015): 1-9.
13. K. Sun, et al. "3D printing of interdigitated Li-Ion microbattery architectures." *Advanced materials* 25.33 (2013): 4539-4543.
14. Y. L. Kong, et al. "3D printed quantum dot light-emitting diodes." *Nano letters* 14.12 (2014): 7017-7023.
15. R. D. Gerke, "Embedded passives technology." *Resistor* 146.188 (2005): 635.
16. N. Zhou, et al. "Gigahertz electromagnetic structures via direct ink writing for radio-frequency oscillator and transmitter applications." *Advanced Materials* 29.15 (2017): 1605198..
17. J. J. Adams, et al. "Conformal printing of electrically small antennas on three-dimensional surfaces." *Advanced Materials* 23.11 (2011): 1335-1340.
18. Y. Lu, et al. "Direct-print/cure as a molded interconnect device (MID) process for fabrication of automobile cruise controllers." *Journal of Mechanical Science and Technology* 29.12 (2015): 5377-5385.
19. J. A. Lewis, and B. Y. Ahn. "Three-dimensional printed electronics." *Nature* 518.7537 (2015): 42-43.
20. J. C. Bae, et al. "3D-Printed Quantum Dot Nanopixels." *ACS nano* 14.9 (2020): 10993-11001.
21. Y. Huang, et al. "3D-Printed OFETs of the 1, 4-bis (3-phenylquinoxalin-2-yl) benzene-based polymer semiconductors." *Polymer Chemistry* 8.33 (2017): 4878-4886.
22. D. Majak, J. Fan, and M. Gupta. "Fully 3D printed OECT based logic gate for detection of cation type and concentration." *Sensors and Actuators B: Chemical* 286 (2019): 111-118.
23. J. Kwon, et al. "Three-dimensional monolithic integration in flexible printed organic transistors." *Nature communications* 10.1 (2019): 1-10.
24. P. C. Hütter, et al. "Efficiency of the switching process in organic electrochemical transistors." *ACS applied materials & interfaces* 8.22 (2016): 14071-14076.
25. X. Li, et al. "3D-printed stretchable micro-supercapacitor with

- remarkable areal performance.” *Advanced Energy Materials* 10.14 (2020): 1903794.
26. H. Cui, et al. “Three-dimensional printing of piezoelectric materials with designed anisotropy and directional response.” *Nature materials* 18.3 (2019): 234-241.
  27. F. Kim, et al. “3D printing of shape-conformable thermoelectric materials using all-inorganic Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based inks.” *Nature Energy* 3.4 (2018): 301-309..
  28. M. P. Mahmud, et al. “3D-Printed Triboelectric Nanogenerators: State of the Art, Applications, and Challenges.” *Advanced Energy and Sustainability Research* 2.3 (2021): 2000045.
  29. N. Zhou, et al. “Perovskite nanowire–block copolymer composites with digitally programmable polarization anisotropy.” *Science advances* 5.5 (2019): eaav8141.
  30. M. Chen, et al. “3D nanoprinting of perovskites.” *Advanced Materials* 31.44 (2019): 1904073..
  31. M. L. Seol, et al. “All 3D printed energy harvester for autonomous and sustainable resource utilization.” *Nano Energy* 52 (2018): 271-278.
  32. H. Li, et al. “3D printed flexible triboelectric nanogenerator with viscoelastic inks for mechanical energy harvesting.” *Nano Energy* 58 (2019): 447-454.
  33. Y. Ni, et al. “A review of 3D-printed sensors.” *Applied Spectroscopy Reviews* 52.7 (2017): 623-652.
  34. S. Z. Guo, et al. “3D printed stretchable tactile sensors.” *Advanced Materials* 29.27 (2017): 1701218.
  35. R. I. Haque, et al. “Self-powered triboelectric touch sensor made of 3D printed materials.” *Nano Energy* 52 (2018): 54-62.
  36. J. H. Kang, et al. “Three-dimensionally printed pressure sensor arrays from hysteresis-less stretchable piezoresistive composites.” *RSC Advances* 9.68 (2019): 39993-40002.
  37. K. Li, et al. “3D printed stretchable capacitive sensors for highly sensitive tactile and electrochemical sensing.” *Nanotechnology* 29.18 (2018): 185501.
  38. S. H. Park, et al. “3D printed polymer photodetectors.” *Advanced Materials* 30.40 (2018): 1803980.
  39. M. G. Kang, S. D. Kim, “Bonding Technologies for Chip to Textile Interconnection”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 27(4), 1-10, 2020.
  40. Y. Hong, et al. “3D printed microfluidic device with microporous Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-modified screen printed electrode for real-time determination of heavy metal ions.” *ACS applied materials & interfaces* 8.48 (2016): 32940-32947.
  41. M. S. Mannoor, et al. “3D printed bionic ears.” *Nano letters* 13.6 (2013): 2634-2639.
  42. Y. H. Cho, et al. “3D Electrodes for Bioelectronics.” *Advanced Materials* (2021): 2005805.
  43. K. Yamada, M. Watanabe, and J. Sone. “Three-dimensional printing of conducting polymer microstructures into transparent polymer sheet: Relationship between process resolution and illumination conditions.” *Optical Review* 21.5 (2014): 679-682.
  44. A. D. Valentine, et al. “Hybrid 3D printing of soft electronics.” *advanced Materials* 29.40 (2017): 1703817.
  45. W. I. Jung, et al. “Three-dimensional nanoprinting via charged aerosol jets.” *Nature* 592.7852 (2021): 54-59.
  46. Y. S. Park, et al. “Near-field electrospinning for three-dimensional stacked nanoarchitectures with high aspect ratios.” *Nano letters* 20.1 (2019): 441-448.
  47. T. Tilford, et al. “Design, manufacture and test for reliable 3D printed electronics packaging.” *Microelectronics Reliability* 85 (2018): 109-117.



- 강승균
- 서울대학교 재료공학부
- 생분해성 전자소재, 유연 신축 소자, 복합 환경 신뢰성, 3D 전자소자
- E-mail : kskg7227@snu.ac.kr



- 박예슬
- 서울대학교 재료공학부
- 3차원 인쇄 전자소자
- E-mail : yes0403@snu.ac.kr



- 이주용
- 서울대학교 재료공학부
- 3차원 인쇄 전자소자
- E-mail : seoulboy@snu.ac.kr